

PROCESO DE DISEÑO DE SISTEMAS TRANSFORMABLES EN LAS CUBIERTAS LIGERAS¹

Artículo de Investigación - Recibido: 27 de mayo de 2014. Aceptado: 1 de septiembre de 2014

doi: <http://dx.doi.org/10.17981/moducuc.14.1.2015.5>

Carlos César Morales Guzmán²

Universidad Veracruzana, México - carlmorales@uv.mx

Para citar este artículo / to reference this article:

Morales, C. G. (2015). Proceso de diseño de sistemas transformables en las cubiertas ligeras. *Módulo Arquitectura CUC*, Vol. 14 No. 1, 73-96. doi: <http://dx.doi.org/10.17981/moducuc.14.1.2015.5>

Resumen

Se presentan los resultados de la investigación desarrollada bajo la línea de investigación del grupo Arquitectura y urbanismo, cuyo objetivo es analizar el diseño arquitectónico a través de la creación de sistemas transformables, relacionados con una arquitectura cambiante, que transforma el espacio más rápidamente y con diferentes funciones. En la actualidad, se requieren espacios cada vez más dinámicos para realizar diferentes eventos. Es por ello que se busca la creación de formas para diseñar sistemas estructurales versátiles. El referente directo de este tipo de sistema es el Arq. Emilio Pérez Piñero, con su Teatro Ambulante, el cual generó una serie de tijeretas plegables para formar una cúpula plegable fácil de transportar. Lo más destacado de este tipo de sistemas es la rapidez con que se puede solucionar la cubierta de un espacio, en el que se destaca un proceso metodológico de diseño para elaborar propuestas nuevas que desarrollen un sistema de solución más expedito para la propuesta de proyectos arquitectónicos transformables.

Palabras clave:

Sistemas transformables, proceso de diseño, modelos experimentales.

-
- 1 Artículo producto de investigación, realizada en el marco de apoyo al fortalecimiento de Cuerpos Académicos del grupo de investigación Arquitectura y Urbanismo (UV-CA-346), de la Facultad de Arquitectura.
 - 2 Post Doctor en Arquitectura e Ingeniería Transformable, Facultad de Arquitectura, Región Poza Rica (FAUV), Universidad Veracruzana. Poza Rica, México. e-mail: carlmorales@uv.mx

TRANSFORMABLE SYSTEMS DESIGN PROCESS IN THE LIGHT COVERS

Abstract

This article presents the results of the research carried out under the research line of the academic group: Architecture and urbanism and aims to analyze the architectural design through the creation of transformable systems related to a changing architecture, which transforms space faster and with different functions. Today, increasingly dynamic for different events spaces are required. It is for this reason that the creation of forms seeks to design versatile structural systems. The direct example and referent of this type of system is the Architect Emilio Pérez Piñero, with its Traveling Theater, which generated a series of folding earwings to form a collapsible dome easy to transport. The highlight of these systems is how quickly you can solve the deck of a space, in which a methodological design process stands to make new proposals to develop a system to expedite the proposed solution for architectural projects convertible.

Keywords:

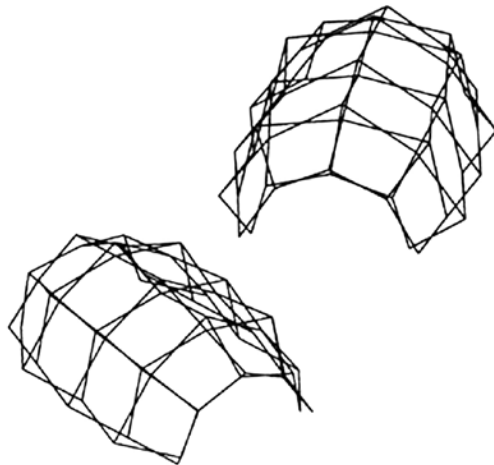
Transformable systems, design process, experimental models.

Introducción

Esta investigación se desplegó a partir del interés por las nuevas tecnologías para la arquitectura, que siempre ha sido una prioridad para el diseño de los espacios habitables; pero en el área de creación de sistemas transformables hay mucha más investigación por desarrollar y generar, ya que estos sistemas responderían de manera más efectiva a los constantes cambios en la arquitectura. En la actualidad, el tema de la arquitectura que caduca es más constante, no solamente en lo que se refiere a la función espacial, sino también en lo estético, y esto motiva a transformar constantemente el entorno, que por lo regular siempre se destruye debido al progreso de la

sociedad. Es aquí donde la tecnología se tiene que desarrollar para mitigar los daños que causa un progreso tan agresivo, cuya transformación ayude a mejorar la capacidad constructiva de crecimiento en los espacios arquitectónicos, con una facilidad de adaptación en su contexto; para lograr esto, se tienen que tomar en cuenta los parámetros de las experimentaciones anteriores (Figuras 1 y 2). Es muy importante resaltar que para el diseño de un buen sistema plegable, este tiene que ser, flexible, modulado (prefabricado) y de fácil transformación; teniendo estas tres características se podría obtener una buena adecuación geométrica.

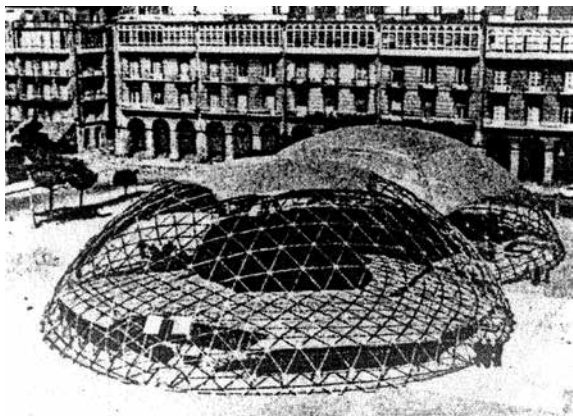
Por esta razón, en un primer nivel, el análisis está dedicado a las adecua-



Figuras 1 y 2. Proyecto cubierta desplegable de aspas para cubrir una piscina unifamiliar (11 x 7 m). Sevilla, Dr. Félix Escrig. La aplicación de estructuras transformables cambia drásticamente el paisaje urbano, ayudando a dar más de una función al espacio arquitectónico.

ciones geométricas, como un sistema estructural, al que se le asignan miembros y dimensiones, bajo principios reglamentados y tipologías teóricas de las estructuras, que ayuden a comprender o a simplificar el método de análisis de dicho sistema, cuyos parámetros servirán para desarrollar un prototipo a escala real, con el que se pueda estudiar y analizar su comportamiento estructural, para determinar si la geometría propuesta es la adecuada para el proceso constructivo, al que se le asignarán los detalles estructurales correspondientes. Cabe hacer mención que esto solo se hará hasta una etapa experimental, ya que la resolución de esta investigación está sometida a comprobar la búsqueda de un diseño y construcción de una cubierta ligera retráctil tensada.

Los referentes principales de la cubierta retráctil emanan de dos prototipos; uno es la obra de Emilio Pérez Piñero. Este arquitecto, que nació en Valencia poco antes de la Guerra Civil (1935-1972), se trasladó siendo muy niño a Calasparra (Figuras 3 y 4), en donde fue separado de su padre debido a las luchas bélicas de la época. En 1957 viaja a Madrid y comienza sus estudios en la Escuela Superior Técnica de Arquitectura. En 1961, en el VI Congreso de la Unión Internacional de Arquitectos celebrado en Londres, presentó un proyecto de 'Teatro Ambulante', con capacidad para 500 espectadores. Con este proyecto dio inicio a sus inquietudes estructurales para crear elementos de montaje y desmontaje rápido y económico, en gran similitud con las obras de Buckminster Fuller.



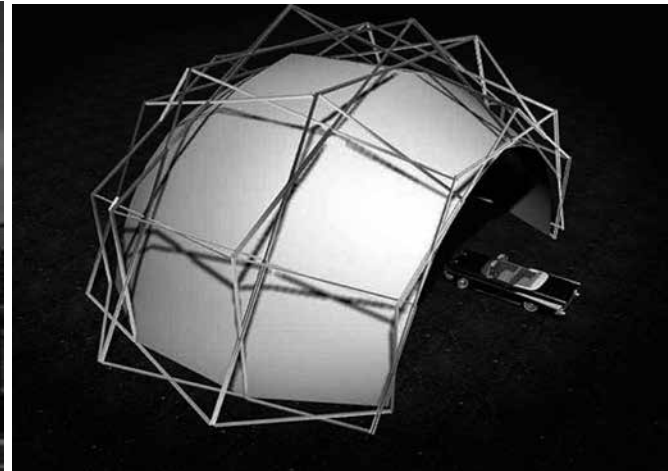
Figuras 3 y 4. Teatro transportable para festivales de verano

Fuente: www.perezpinero.org

También es conocido su proyecto para un cinerama, que consistía en una cúpula semiesférica con un sistema constructivo a base de discos hexagonales que se conectaban entre sí directamente. La estructura completa se construyó en el taller de Calasparra, en el año 1967, la cual realizó un recorrido itinerante por muchas ciudades españolas. El análisis de las estructuras de Piñero aporta a nuestra investigación de las estructuras el concepto de movilidad y adaptabilidad dentro de un entorno variable.

En 1987, Carlos Hernández y Zalezwky desarrollan la tesis “Deployable Structures” (Estructuras transformables) en el Massachusetts Institute of Technology - MIT y posteriormente en el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construc-

ción - IDEC, con su prototipo ESTRAN1. Con estos estudios se consolidan las estructuras transformables como un sistema estructural viable (Figuras 5 y 6), ya que resuelven problemas constructivos, de montaje, proceso de despliegue, así como también de estabilidad estructural, resistencia al desgaste, diseño de nudos, accesorios de reagudización y cubierta. El prototipo ESTRAN1 es una retícula espacial transformable proyectada sobre un cilindro, produciendo una bóveda de cañón largo, que cubre un área de 112 m^2 ($8 \times 14 \text{ m}$) con una altura de 7 m y un peso de 800 kg , para un total de 7 kg/m^2 ; la estructura está formada por tres arcos paralelos plegables, unidos por nudos tipo tijera. A su vez, estos arcos están unidos por otros elementos tipo tijera dispuestos radialmente, generados



Figuras 5 y 6. Hernández W. Zalezwky, 1987. Desarrollo de nudo tipo tijera y la bóveda de cañón largo.

por el eje de rotación del cilindro, siendo este plegable en los dos sentidos.

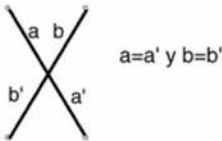

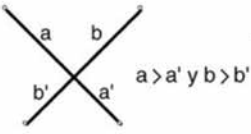
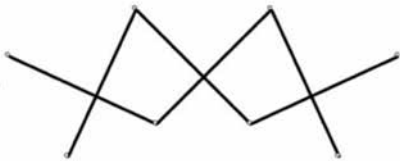
En la búsqueda de nuevas tecnologías se experimentó con modelos de formas básicas plegables, esto para que se faciliten las nuevas transformaciones de los espacios arquitectónicos. La morfología-conceptual de los siguientes modelos es la segmentación de la figura esférica, con la pequeña característica del uso de tijeretas plegables, que son las mismas que se han estado describiendo. Para la generación de geometrías estructurales flexibles, que en este caso ayudarán a concebir las formas más aproximadas a las de una cubierta cilíndrica, ya que el diseño de su forma se generará por las iteraciones que producen múltiples

geometrías, pero en este tema solo se utilizarán para generar formas retráctiles básicas; para entender un poco lo que se hará, se experimentará con tres modelos de tijereta, cada una tendrá un modelo geométrico basado en principios matemáticos y graficado con base en su figura matemática, derivada de cada experimento.

Para entender la realización de la forma de este tipo de estructura se hizo la Tabla 1, que contiene los principios básicos que debe tener una estructura geoméricamente plegable; si esto no está contemplado, la flexibilidad dentro del sistema estructural no se dará. Asumiendo este principio básico, se podrá hacer la traslación geométrica matemática.

Tabla 1

Formas básicas para generar una estructura plegable. Fuente: Rodríguez (2007)

Sistema de tijera	
Condición geométrica básica	
 $a=a' \text{ y } b=b'$ 	Este sistema de tijera es llamado también por la bibliografía "Pantógrafo", el cual se basa en un nudo intermedio pivotante y dos ubicados en los extremos. Estos puntos pivotantes tienen total grado de libertad entre dos barras, en el eje perpendicular del plano del pantógrafo.
 $a>a' \text{ y } b>b'$ 	

ca o descriptiva de la estructura que se experimenta y así crearle una serie de iteraciones y modulaciones arquitectónicas, lo que conducirá a una serie de propuestas geométricas.

Por principio se tiene que entender que el proceso de desplegado puede ser más o menos complejo, dependiendo del trabajo y la especialización que se requiera y la cantidad de medios auxiliares necesarios. Se puede observar en las imágenes experimentales el funcionamiento de las estructuras cuyo proceso de apertura y cierre sea tan elemental, que pueda realizarse en pocos minutos y con los propios dispositivos internos del sistema; es decir, estructuras que pueden tomar varias configuraciones en el espacio o bloquearse en varias de ellas, fundamentalmente en estado de máximo desplegado o de mínimo volumen.

Las tipologías de estructuras que cumplen con estos requisitos y que tienen una bibliografía mínima y unas aplicaciones estudiadas, son:

a) Tipo paraguas. Estructuras que se pliegan sobre un mástil mediante el deslizamiento de un punto de apoyo sobre él. Son estructuras adecuadas para luces pequeñas (Figura 7), no mayores de 5 m, y tienen su utilidad como mobiliario urbano.

b) Tipo mecanismo con articulaciones bloqueables. Tal como se expresa

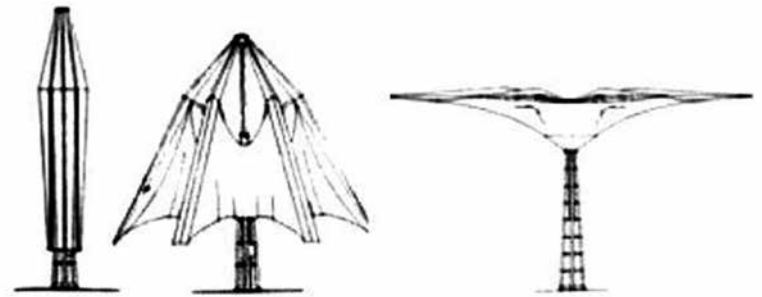
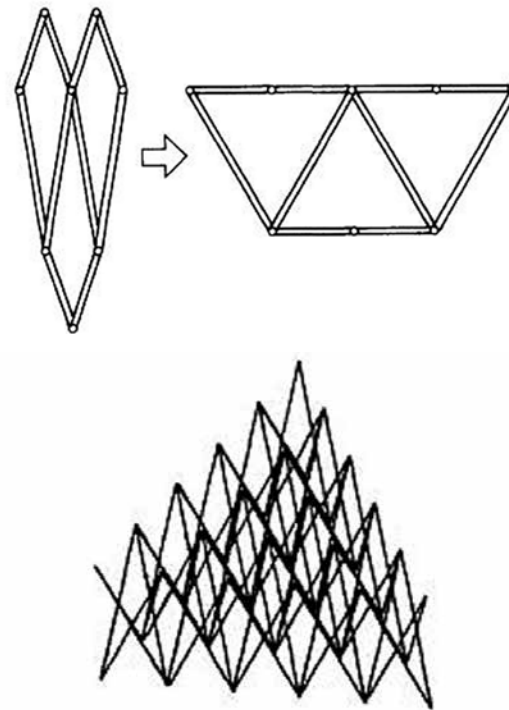


Figura 7. El mecanismo tipo paraguas es muy sencillo, por lo que es uno de los sistemas más rápidos de manufacturar

Fuente: Rodríguez, 2007



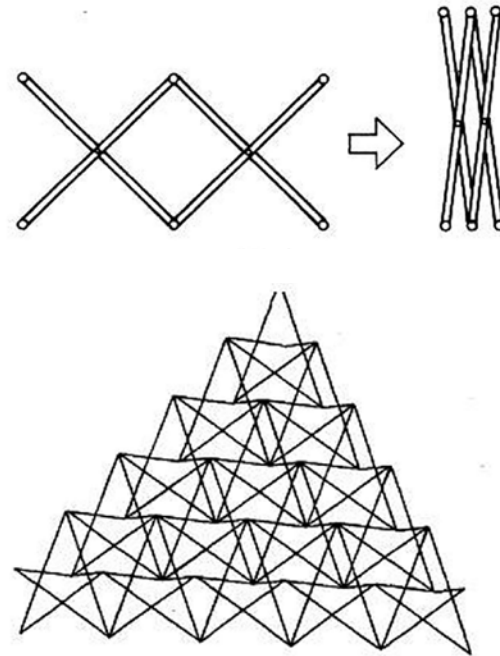
Figuras 8 y 9. Desarrollo de tijereta con topes de movimiento

Fuente: Escrig y Valcárcel, 1988

genéricamente en las Figuras 8 y 9, en donde las articulaciones en el interior de las barras, una vez que la estructura se ha abierto, se bloquean y la hacen rígida. Tienen el inconveniente de que el proceso de cierre es complicado y requiere soltar uno a uno todos los cierres, pero en cambio son estructuras muy rígidas y se usan frecuentemente en instalaciones aeroespaciales.

c) Tipo aspa. Se basan en las distintas posiciones que puede tomar un elemento como el de las Figuras 10 y 11. Estas estructuras están bien estudiadas en sus configuraciones elementales y son mecanismos que se obtienen combinando espacialmente piezas como las de la Figura 10. El conjunto es móvil porque es inestable y puede plegarse y desplegarse sometido únicamente a las leyes de la compatibilidad geométrica de las barras. Para que sirvan como estructura, estos conjuntos deben estabilizarse en alguna posición. Pero a diferencia de lo que ocurría en las estructuras de articulación bloqueable, basta con fijar dos nudos para que toda la estructura funcione.

Existen más tipologías de estructuras plegables, pero en el presente trabajo solo se tratan estos dos sistemas, para generar la metodología constructiva de diseño arquitectónico. Como consecuencia, se producirán propuestas arquitectónicas aproximadas que ayudarán a entender la utilización de las geometrías



Figuras 10 y 11. Desarrollo de tijeretas con combinaciones triangulares

Fuente: Escrig y Valcárcel, 1988

dinámicas para la generación de sistemas transformables.

Metodología

Teniendo en cuenta que el objetivo de la investigación es aportar al desarrollo de una adecuación geométrica estructural, que se pueda utilizar para el perfeccionamiento de un sistema más flexible, el cual partirá de avances modelísticos de estructuras ligeras y metodologías de diseño de sistemas estructurales retrácti-

les para la creación de un lugar transformable y cambiante de acuerdo con sus necesidades y expectativas, que tenga que cumplir, tal vez, el proceso de un sistema estructural más flexible, que logrará un lugar que, además de activo-cambiante, sea un lugar de interacción con el medioambiente. Se parte de descomponer la investigación en dos escalas: la exploración conceptual y adecuación, y el análisis del sistema y su tecnología, lo que marca puntos más específicos y con ello, solo se hará la búsqueda del sistema plegable, ya que la configuración de la piel, que es una membrana, adoptará la forma de la cubierta retráctil y, por esta razón, la búsqueda se concentrará en el desarrollo del sistema transformable.

Exploración conceptual y adecuación

Se realizarán aproximaciones experimentales como principio de diseño, que tengan como base la plegabilidad, generando la búsqueda de geometrías que ayuden a adecuar el sistema concebido (Figura 12). Posteriormente, se crea un modelo que servirá como guía, como premisa y cota del proceso del prototipo final.

Como consecuencia, se gestarán espacios versátiles que puedan prestarse a diferentes funciones, pero también se estudiarán las posibles iteraciones de las adecuaciones conceptuales, las cuales generan también modelos de integración

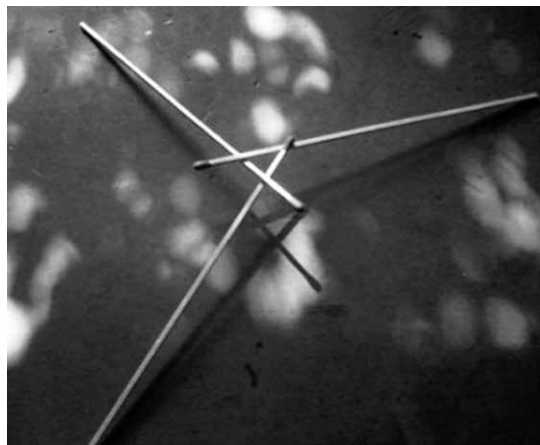


Figura 12. La estructura se genera a partir de una geometría, crea un sistema estructural más ligero y de fácil transformación espacial

Fuente: Arquitectura y tecnología (2010)

al sitio, pero limitados a buscar sistemas plegables retráctiles que se puedan adaptar y transformar en diferentes espacios.

Análisis del sistema

Se analizarán las adecuaciones logradas en la etapa experimental y se desarrollará una metodología de diseño, para comprender el tipo de conexiones constructivas de este tipo de sistemas para, posteriormente, analizar las geometrías obtenidas en la investigación y así implementarlas a diseños estructurales adecuados para este tipo de sistemas. Se desarrollarán tecnologías y formas versátiles, pues estas tendrán las características de ser prefabricadas y fá-

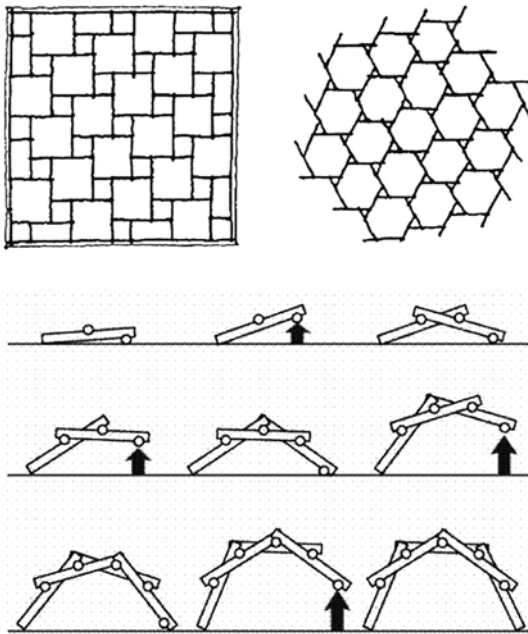


Figura 13. El proceso para la creación de un modelo conceptual proviene de la modelación. Este planteamiento crea los primeros conceptos de la investigación y la generación de su tecnología

Fuente: Fotos experimentales, Morales (2007)

ciles de transportar (Figura 13). Por esta versatilidad, solo se estudiarán estructuras hechas con materiales ligeros, para la creación de un sistema de accesorios industrializados dentro del modelo. Su análisis abarcará también los sistemas de modulación, que obligarán a mantener un mayor nivel de diseño e innovación tecnológica y, como consecuencia, se conseguirá que estos espacios posean una verdadera flexibilidad.

La investigación se limitó a desarrollar e interpretar los sistemas plegables como un sistema estructural (Figura 14). Estas formas se irán descubriendo por medio de métodos modelísticos, que ayudarán a procesar un sistema equilibrado y resistente. Esta conceptualización proviene de la interpretación del sistema estructural de las estructuras transformables, ya que aporta los pasos a seguir para la generación de estructuras ligeras. Para ello se harán una serie de procesos que permitirán descubrir cómo el uso de esta metodología experimental por modelos a escalas casi reales permite plantear el diseño de sistemas transformables, considerando que las estructuras en la edificación por lo regular son rígidas

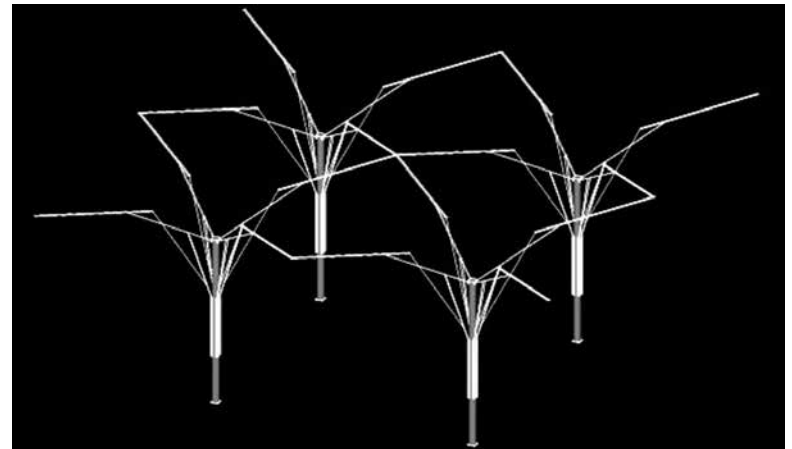


Figura 14. Un sistema estructural flexible provocaría una mayor adaptabilidad dentro de los espacios; en consecuencia, un espacio más ágil que utilizar e interactuar

Fuente: www.efimeras.com (2010)

y evitan un desarrollo más ágil. La falta de parámetros de crecimiento en esas estructuras es un factor que influye en las transformaciones que las hace caducas; por eso, es necesario que diseñadores del espacio arquitectónico sean más creativos en su solución, ya que actualmente el habitante está sometido a constantes cambios, que obligan a concebir mejores tecnologías para cubrir los espacios arquitectónicos por medio de estructuras flexibles, transformables, versátiles y adaptables (Figura 15), para la satisfacción de las necesidades imperantes de los usuarios.

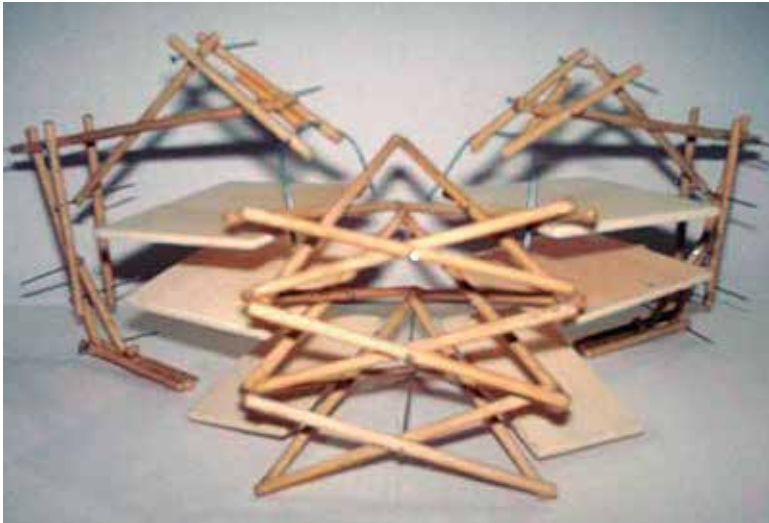


Figura 15. El desarrollo de formas transformables provoca órdenes geométricos más adecuados dentro del espacio arquitectónico, con parámetros de diseño más acordes para su posterior crecimiento

Fuente: likedesigns (2010)

Para tal fin, se realizarán varias aproximaciones a escala, para entender el proceso de un sistema estructural retráctil, en el que la articulación de sus uniones es la parte más trascendental en el desarrollo de la investigación, porque le permitirá tener flexibilidad estructural dentro del sistema, y a la vez, la generación de detalles estructurales a través de modelos y simulaciones, dejando un método a seguir para su análisis estructural.

Por su finalidad, las estructuras transformables siempre están sujetas a una sola condición: que su cubierta o piel sea ligera; por lo regular se diseñan para cubrir con diferentes tipos de funciones y, consecuentemente, la red estructural plegable no solamente puede ser útil como módulo de cobijo, sino también puede ser cambiante en sus funciones arquitectónicas; esto dejará un sistema alternativo de construcción, de modo de vivir, debido a las características anteriormente descritas.

Resultados

A continuación se describe el desarrollo modelístico empírico empleado a través de modelos a escala, en el que se puede utilizar este método, para aplicar rápidamente el modelo sustentado en el desarrollo modular del sistema. En consecuencia, se desarrollan los modelos experimentales que ayudarán a entender el movimiento que tendrá la estructura,

en la que se observa la modelación de sus uniones y qué tipología es la que le viene mejor, para construir el prototipo experimental a escalas más grandes, y comprender así el movimiento y los grados de libertad que debiera tener la estructura transformable; con esto se obtienen los medios de verificación para la producción del prototipo final. Para justificar el desarrollo de estos modelos arquitectónicos plegables, se generan las condiciones básicas geométricas representadas en el pantógrafo de la Tabla 1, en la que se forja un sistema estructural articulado y versátil que pueda incidir en la modulación de la estructura; esto hace que el espacio arquitectónico sea más dinámico. Interpretando los conceptos anteriores, se retoma el concepto del sistema de paraguas retráctil, para la adecuación geométrica de este primer ensayo y para desarrollar su modulación y definición de la estabilidad estructural.

La primera aproximación experimental se aplicó a una cubierta transformable tipo paraguas; esta se desarrolla iniciando con la utilización del brazo plegable que articula su movimiento. Otra parte importante en la estructura es el nodo ascendente, que ayuda a desplegar diferentes formas de la figura, es por eso que la propiedad cambiante de la estructura es articulada, y puede adoptar varias formas; en este caso se tomará para la construcción de una cubierta retráctil.

Este primer proyecto experimental se define con la iteración articulada de sus miembros lineales, que generan una combinación paramétrica en varios puntos móviles, pero la función de esta es modular en sus miembros estructurales, solo así se logrará la versatilidad espacial del modelo. En las Figuras 16, 17 y 18 se observa que la estructura geométrica está compuesta por una figura base articulada que se repite cuatro veces, esta forma un poste central que favorece la estabilidad, así como también procesa un accesorio retráctil en el centro que la hace desplegarse hacia arriba y hacia abajo.

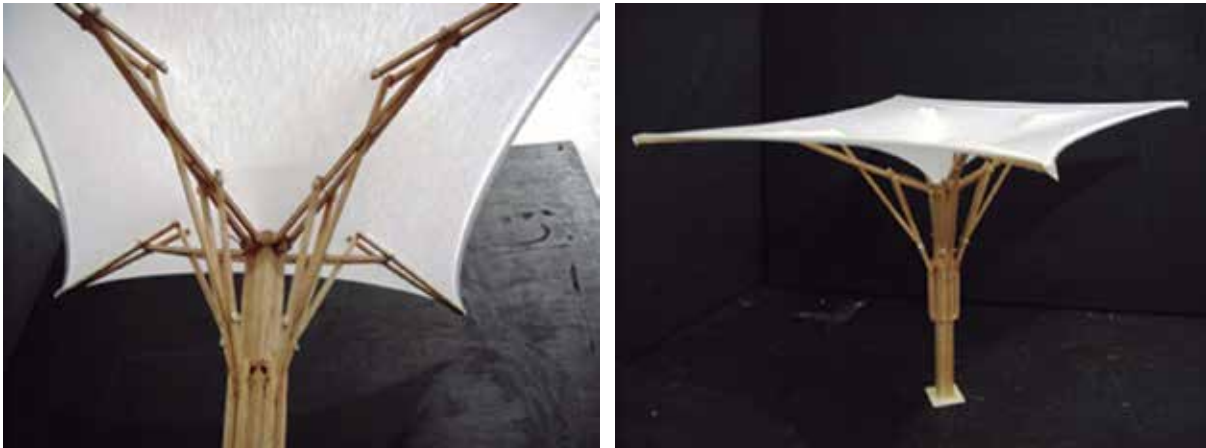
La interpretación estructural está fundamentada en la tenso estructura, ya que la cubierta se rige también por la superficie textil (velaría) colocada en la parte superior de la estructura, concebida como un sistema basado en nodos articulados (Figuras 19 y 20); esto aporta una propuesta geométrica formal, que se aprovecha para saber el porqué del origen de la misma, extrapolando sus principios técnicos y morfológicos, para crear una propuesta más flexible, que puede llegar a reproducirse en un entorno variable.

La segunda propuesta aproximada se despliega bajo un sistema mecanizado retráctil de tope y está conformada por arcos que se pliegan hasta formar una concha esférica. Posteriormente, se



Figuras 16, 17 y 18. La adecuación geométrica de esta estructura biónica es una fractal lineal, pues su estructura se segmenta ortogonalmente, pero con el concurso de las articulaciones, éstas son las que le dan la certidumbre de ser un fractal, ya que se reproduce a través de una figura base

Fuente: Taller de Síntesis del Diseño, realizado en 2012



Figuras 19 y 20. La propuesta termina con una interpretación arquitectónica, generada por una cubierta tipo paraguas plegable, que se despliega con una superficie mínima en su techumbre y produce una serie de accesorios articulados que le dan la capacidad de transformarse constantemente.

Fuente: Taller de Síntesis del Diseño, realizado en 2012

genera la modulación estructural del conjunto, para la conformación de la figura geométrica que se convierte en un espacio orgánico modular, mediante el cual se pueden gestar varias posiciones en su entorno, produciendo transformaciones variadas en su estructura, cubriendo varias funciones dentro de su espacio; en este caso, concurrirá en otra cubierta ligera retráctil.

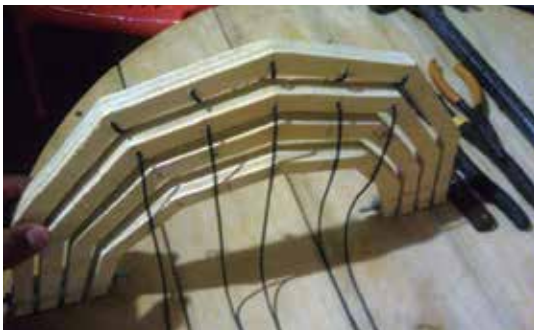
Su desarrollo geométrico está basado en la geometría transformable, que tiene la particularidad de unir una geometría flexible que realiza su iteración de forma modular, ya que se segmenta a través de una figura base en su propio espacio (Figuras 21, 22 y 23), donde se observa que la figura base del arco que forma un semicírculo se repite en varios planos, interceptando sus nodos y formando una cubierta esférica. Esta aporta una cubierta de superficie mínima, lo que ayuda a que su geometría sea más versátil y modular.

En cuanto a la interpretación estructural, esta se generó bajo el principio de una esfera plegable con una superficie mínima. Este sistema transformable estructural permite ver qué predomina en los sistemas que utilizan la menor cantidad de material para procesar sus miembros estructurales y la utilización de una piel, lo más ligera posible, para no agregar más peso en su sistema. En las figuras se puede observar que el prototipo parte de una unión articulada, que

pliega a los demás miembros, y éstas auxilian a la estructura para que pueda cambiar constantemente de forma y adecuarse a su entorno.

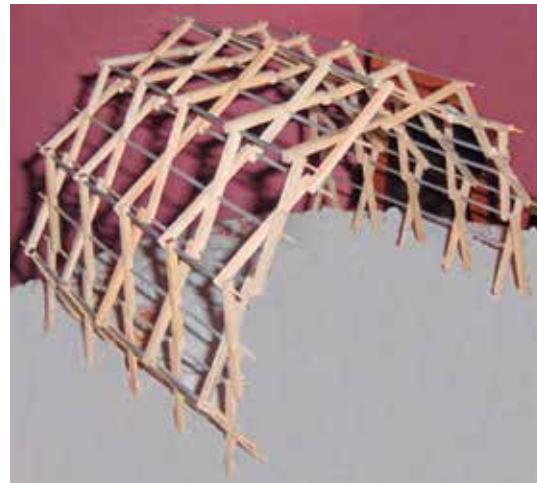
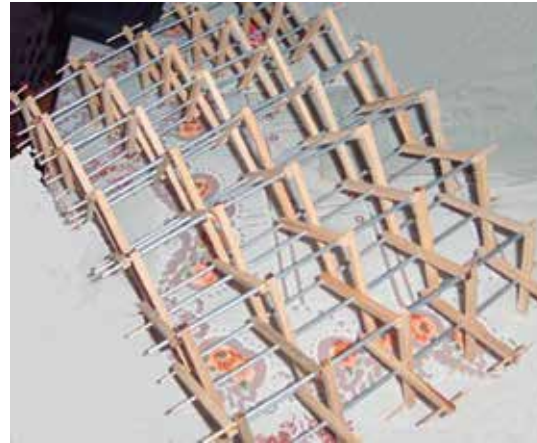
Por último, la tercera experimentación; esta se aplica bajo una geometría cilíndrica esférica. El concepto que se toma es la modulación y la adaptación de la estructura en el espacio con la utilización de una malla articulada (Figuras 24 y 25). Observando esta retícula modular se puede implementar una geometría en la que sea posible reproducirla varias veces para integrar su estructura geométrica espacial. Esta retícula se basó en los principios geométricos de la segmentación de la figura; para este caso se construyó una malla reticular plegable con una figura en forma de “X”, que está diseñada para desplegar un arco, y su repetición genera varios espacios modulares, fáciles de montar en cualquier lugar.

Posteriormente se realizan evoluciones de modelos tridimensionales conceptuales. Rápidamente se logra crear la adecuación geométrica del modelo, en donde fue aplicado el concepto de la tijereta en una malla cilíndrica, que es la que domina el proyecto de este modelo, en el que su principal característica es la función plegable de la estructura, procesada por láminas en forma de “X”: estas se pliegan en un sentido y cuando se abren forman un arco grande.



Figuras 21, 22 y 23. La segunda propuesta aproximada se procesa bajo una morfología fenomenológica de la geometría de una telaraña; esta tiene principios que favorecen para formar una serie de uniones flexibles, que le dan la característica de adaptarse a su entorno.

Fuente: Taller de Síntesis del Diseño, realizado en 2012



Figuras 24 y 25. La retícula celular es un buen principio de diseño modular para adaptar el espacio a un terreno irregular; esto dio paso a la generación de una malla plegable en ambos sentidos

Fuente: Fotos experimentales, Morales (2009)

La principal característica de este modelo aproximado es la plegabilidad de sus miembros, con el uso de una malla cilíndrica y las otras dos, de forma cónica, que generan un cañón cilíndrico retráctil.

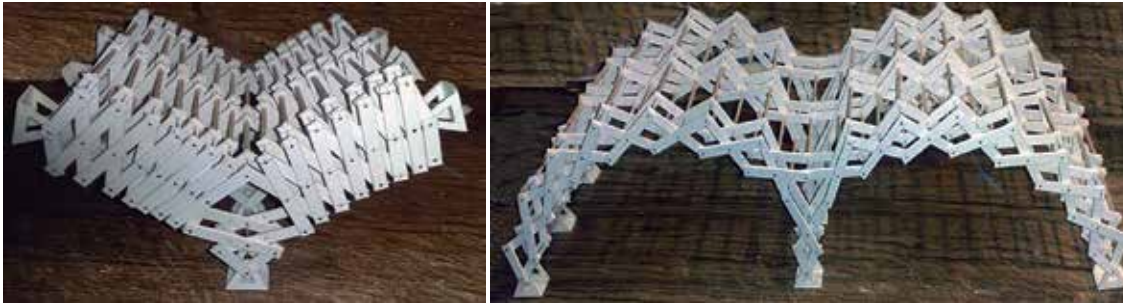
Además, está diseñado de tal forma que recibe la presión de carga y de viento en su superficie, absorbe la fuerza y la redistribuye; a la vez, amortigua las diferentes acciones climáticas que influyen en su contexto (Figuras 26 y 27). Para conseguir esto, primero se esquematizó la malla y la geometría que controlaría el modelo tridimensional, en donde se analizará su forma; esta genera su esqueleto y su geometría nace de un punto central de circunferencia, que le da la forma cilíndrica a la armadura plegable. Esta estructura puede interactuar en varias repeticiones puesto que la malla plegable está organizada por tres arcos principales unidos por vigas, que hacen que tenga una mayor envergadura y estabilidad. Los marcos pueden unirse repetitivamente en ambos sentidos, y con esto se logra el primer cuerpo del modelo para posteriormente experimentar bajo este mismo principio.

Desarrollo de modelos arquitectónicos constructivos

Para generar un esquema arquitectónico-constructivo se procesó la modelación del prototipo a una escala 1:5

para verificar los detalles de conexión constructiva del paraguas retráctil, cuyas articulaciones y conexiones le dan la plegabilidad al sistema. Por ello, era conveniente fabricar el modelo con materiales que tuvieran la resistencia adecuada a la tracción, ya que la tensoestructura (velaría) hace que se rigidicen los miembros estructurales del sistema (Figuras 28, 29, 30 y 31). Entonces, se realizó un nodo móvil ascendente que albergara los ocho miembros articulados; estos a su vez se articulan nuevamente a $1/3$ de su claro para conectarse con otros miembros tubulares que se conectan en el nodo superior fijo, lo que ayuda a sustentar la plegabilidad del sistema retráctil. Posteriormente se coloca un accesorio de refuerzo para conectar las articulaciones de la linternilla de la velaría, que también se fija colocando cables, para tener un tope articulado en la unión metálica del paraguas. Luego se coloca un sistema de poleas que actúan como palancas para subir el nodo ascendente y para plegar la estructura de la vela, manteniendo rígido el sistema estructural.

Ya colocada la velaría en la parte superior de la estructura se instalan tensores reguladores en las uniones metálicas de los bordes tubulares para tensar las relingas en los apoyos extremos de los miembros y, con ello, equilibrar el sistema de la estructura transformable. Posteriormente se prueba la velaría de la estructura con el sistema de poleas



Figuras 26 y 27. La figura principal de la estructura plegable del erizo son los arcos principales que sostienen la edificación, con ellos se forma la longitud del esqueleto y fija su cuerpo al suelo, ya resuelto el tronco de la estructura plegable, ésta puede transportarse muy fácilmente a cualquier parte.

Fuente: Fotos experimentales. Morales (2010)

(Figuras 32 y 33) y se observa cómo el despliegue de la tensoestructura es estable y mantiene una figura adecuada para que permanezcan en equilibrio los esfuerzos de tensión que actúan en su superficie. Una parte importante de esa reagudización de la velaría es el regulador de los bordes; por medio de ellos,

se puede plegar el manto del paraguas retráctil.

Este proceso no demuestra cómo desarrollar una propuesta posterior a una escala real, ya que se pueden tomar varias consideraciones de diseño que ayudarán a definir una propuesta final,



Figuras 28, 29, 30 y 31. El modelado del paraguas retráctil ayudó a generar detalles constructivos más exactos para su óptimo funcionamiento al desplegarlo

es por ello que este proceso de diseño es ideal para generar sistemas transformables. Antes de proyectar, se pueden generar los detalles más óptimos para el funcionamiento del sistema estructural retráctil.

La segunda propuesta arquitectónica constructiva parte de un sistema estructural con tope, y este es generado por el diseño de un cascarón retráctil orgánico; para ello se experimentó con la forma conceptualizada (Figuras 34, 35, 36 y 37) por ello, es importante abordar los detalle de unión, en este caso las articulaciones de los arcos que se plegarán en el sentido horizontal ascendente. Para lograr este tipo de movimiento y el tope adecuado, se diseñó una unión utilizando el principio de la matraca, que ayuda a trabar los arcos a determinadas distancias y con ello se consigue una mejor fijación. Los arcos se recortaron de mayor a menor, porque tienen que plegarse; así, el marco central será el único miembro que estará fijo y estático, ya que mantendrá la estabilidad estructural del sistema. Efectuadas estas modificaciones y colocadas las conexiones en la articulación, se genera la forma adecuada del semicírculo esférico del cascarón.

Una vez realizada esta conexión con sus respectivas separaciones, la rigidez de la estructura se obtendrá por medio de la membrana textil que se colocará por debajo de la estructura; este manto

textil es indispensable ya que proporciona tensión entre los claros (Figuras 38 y 39), Tal tracción hace el efecto de compresión en las piezas que forman la figura orgánica de un cascarón plegable, y con ello se estabiliza la estructura, ya que la membrana funciona como un diafragma rígido en sus separaciones. Esta aportación constructiva da las pautas constructivas para proponer en proyectos de investigación arquitectónica más complejos, que propicien espacios más versátiles, con diferentes funciones.

Por esta razón, el método de diseño modelístico es una herramienta que ayuda a decidir el tipo de sistema plegable que se va a construir, pero lo más importante es que genera una guía de desarrollo tecnológico al aprendizaje y aplicación de la ciencia básica, ya que conceptualmente se pueden hacer comprobaciones empíricas de la forma del sistema y aplicarlas a una simulación estructural posterior; por esto, es transcendental este proceso de diseño, por la transferencia de tecnología a la arquitectura contemporánea.

La última propuesta arquitectónica constructiva se genera en una escala 1:20, en donde se detectará qué tipo de conexión proporciona la mejor movilidad a sus miembros superiores e inferiores, que estarán compuestos por otra placa de nodos para albergar la conexión de contra venteo, ello refuerza con placas



Figuras 32 y 33. El despliegado del modelo ayudó a crear conceptos constructivos del movimiento del sistema plegable del paraguas

Fuente: Morales (2013)



Figuras 34, 35, 36 y 37. La uniones articuladas son una característica principal para generar la forma del sistema estructural del cascarón retráctil; por ello, se utiliza una matraca que ayude a auxiliar el nodo tope

Fuente: Taller de Diseño, realizado en 2013



Figuras 38 y 39. La adecuación geométrica se basó en la geometría esférica, con la cual se desarrolla la segmentación, que es la figura base; en este caso, la figura del arco, que forma una esfera segmentada que se reproduce hasta formar la cubierta plegable.

Fuente: Taller de Diseño, realizado en 2013

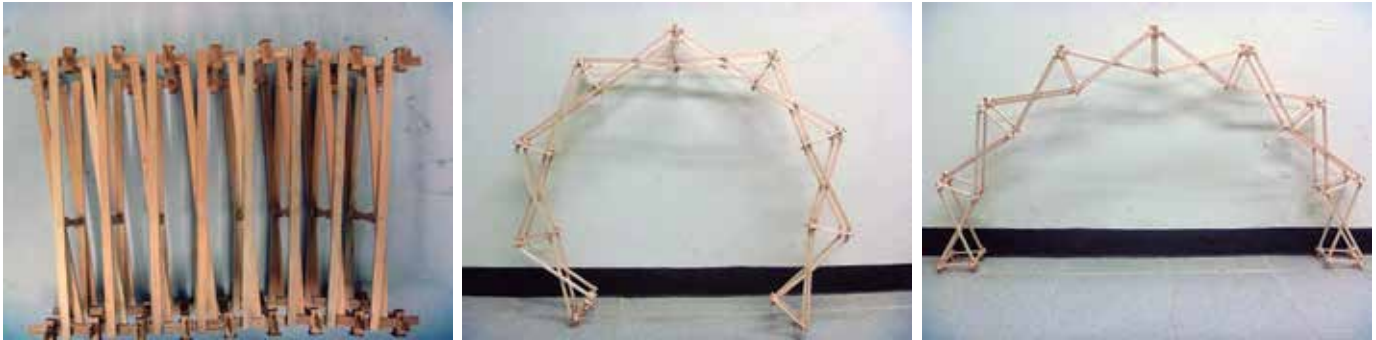
de madera en el cruce, para que no se despegue la pieza a la hora de conectar todos los miembros. Así, todas las conexiones del modelo serán casi iguales, con excepción de la conexión de marco; y a éste —como actúa como viga de alma abierta— se le refuerza con conexiones tubulares. Posteriormente se arma el marco que estabiliza toda la estructura plegable. Las conexiones se hicieron a escala y tuvieron que colocarse clavos reforzados en la unión de placa de madera; esto ayudó mucho pues le dio a la estructura la propiedad de plegarse y retraerse.

Ya terminado el primer marco de la cubierta se le hicieron pruebas de movilidad y plegabilidad (Figuras 40, 41 y 42). Es preciso decir que no resultó al primer armado porque la cubierta tiene la característica de que debe cumplir unidireccionalmente, y las tijeretas se utilizan para que la estructura tenga la facilidad de plegarse y debe tener una unión desfasada de su centro, pues ese desfase es importante para que la unión pueda desplegarse en forma de arco, en el que las conexiones de las tijeretas deben ser exactas, ya que si por error se conectara alguna con el ángulo desfasado o con un larguero que no deba de ir en la conexión, la plegabilidad se deforma y puede llegar a romperse la estructura.

Continuando con el desarrollo del armado de la cubierta, esta se fue armando

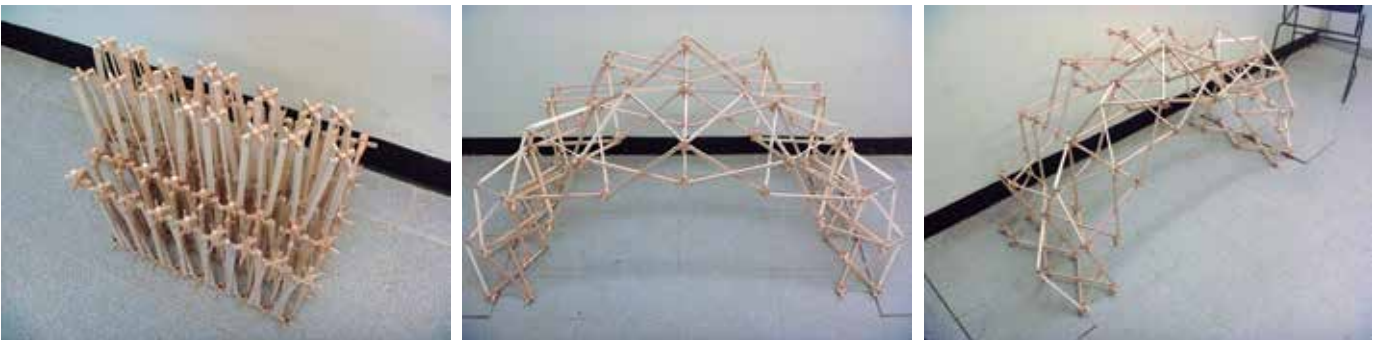
paso por paso, ajustando las conexiones centrales de la estructura, probando poco a poco el plegado y desplegado de la cubierta (Figuras 43, 44 y 45). Se obtuvieron datos de que la plegabilidad en ciertos nodos no coincidía con el nodo de contraventeo, debido a que existía cierta diferencia de distancias entre los miembros de tijera lineal con las tijeras del arco. Solucionando estas diferencias se obtuvieron mejores ensambles entre ellas, y con esto las uniones en la estructura no tuvieron más problemas de conexión, ayudando al óptimo plegado y desplegado de la misma.

Una vez terminadas las conexiones de los módulos y conectados los contraventeos se probó la plegabilidad en conjunto de la estructura y no se detectó ningún problema, solo se observó que el material utilizado no era el más óptimo y debido al cambio de escalas, al probar la plegabilidad de la cubierta, muchas piezas no resistieron los esfuerzos (Figuras 46 y 47). En este paso, fueron colocados los rigidizadores verticales; al contrario de los horizontales, los verticales cumplen la función de rigidizar la estructura e inmovilizarla para obtener mayor resistencia, pero se observó que también provoca que los esfuerzos se concentren en estos miembros y actúen en compresión pura y otros a tracción, los cuales dañan los nodos, provocando desgarramiento. A pesar de esto, se pudo armar y rigidizar el modelo satisfactoriamente. El siguiente



Figuras 40, 41 y 42. El marco es una de las piezas fundamentales para la estabilidad del modelo, así que constantemente se observó la plegabilidad de sus miembros y que su forma fuese la correcta

Fuente: Fotos Experimentales. Morales (2010)



Figuras 43, 44 y 45. El armado de los contraventeos fue una de las conexiones claves para el funcionamiento de toda la cubierta. En este caso, se analizó que cada módulo que se conectó se plegara correctamente

Fuente: Fotos Experimentales. Morales (2010)

te paso fue colocar en la parte inferior de la estructura una manta plastificada que simulara la velaría (Figuras 48 y 49) que cumple con la función de rigidizar la estructura y ayuda a estabilizarla gracias al pretensado, aunque la desventaja que se encontró fue el aumento considerable de los esfuerzos debido a las presiones del aire sobre la superficie activa de la

velaría. En conclusión, la experimentación del modelo proporcionó parámetros de diseño.

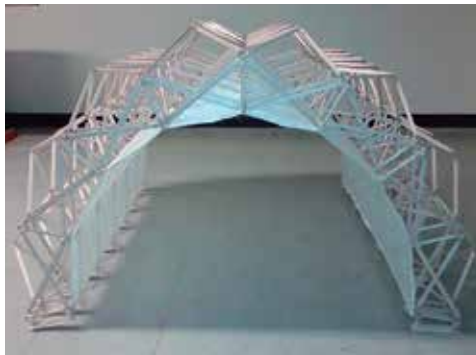
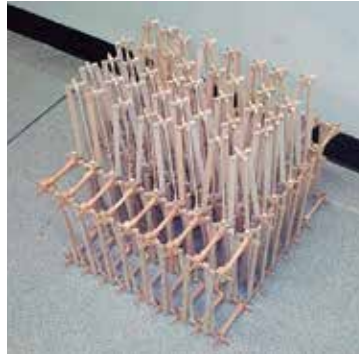
Discusión

En el estudio de la tecnología estructural y la industrialización del espacio se desarrolló la investigación, con base en

Figuras 46 y 47.

Posteriormente, en el armado final de la cubierta, se cuidó de que todas las partes fuesen compatibles y no tuvieran ningún error de conexión.

Fuente: Fotos Experimentales. Morales, (2010)



Figuras 48 y 49. La cubierta ya terminada, tendrá el pretensado correcto para rigidizar la cubierta cilíndrica retráctil.

Fuente: Fotos Experimentales. Morales, (2010)

un principio estructural transformable; esta se manejó como un sistema plegable retráctil, lo que da por resultado una estructura flexible, adaptable a su contexto, en sus formas y versátil al cambiar los espacios de estas estructuras. Y su principio de diseño partió de la elaboración de un proceso modelístico, que podía unir dos elementos, creando un sistema estructural muy flexible y resistente.

Toda esta perspectiva conceptual es justificada por las tendencias tecnológicas encontradas en la línea histórica de los sistemas transformables, los cuales dejan principios básicos que pueden

ayudar a reforzar la metodología de diseño concebida para este estudio. En la estructura del tiempo se encontraron dos principios básicos que se tomaron como premisa para el diseño de una cubierta plegable, que dieron origen a esta obra: la flexibilidad constructiva, como las tiendas de las tribus beduinas; la prefabricación, como la implementó el arquitecto Emilio Pérez Piñero, creando así un icono de diseño para la investigación en este tipo de estructuras.

Sin embargo, la investigación teórica sobre las hipótesis encontradas para ejecutar un sistema transformable, fue un

factor muy importante para una primera aproximación conceptual, porque sus aportaciones teórico-prácticas, que se toman como un principio formal de la metodología de adecuación geométrica, y que ayudaron a concebir las estructuras plegables, dieron origen a hipótesis de desarrollo geométrico, y esto se compara con propuestas aproximadas de conexiones, para lo cual se requiere ahondar aún más sobre este tema, en estudios futuros.

Las ideas conceptuales ayudaron a crear modelos esquemáticos de estructuras plegables; estos solo se implementarán para el desarrollo de un principio de diseño estructural, que pueda crear un sistema retráctil, esto, para obtener parámetros para el producto experimental de la investigación. Dichos modelos generan una premisa teórica constructiva para confeccionar este tipo de sistemas.

En cuanto a la aplicación de los conceptos, se ejecutaron varias aproximaciones sucesivas por medio de experimentaciones modelísticas estudiadas e investigadas, en las que se encontraron hipótesis, las cuales se acoplaban muy fácilmente al proyecto y esto ayudó a determinar la geometría más óptima para realizar un sistema plegable.

Todo esto deja una propuesta para hacer posteriormente un análisis estruc-

tural sobre dichas modelaciones, que se analizan bajo la estructura de los referentes que interesan, para saber el por qué del origen de un método utilizado, extrapolando información de distintas normativas constructivas y apoyados en programas informáticos para realizar con más rapidez el análisis estructural de estos sistemas. Con esto, se teoriza una aproximación de utilización funcional, por medio de la aplicación de normas y reglamentos, dependiendo del uso de la estructura, que en este caso se deja abierto al diseño de un espacio tipo industrial, y que la estructura resultante pueda cumplir con otras funciones, gracias a su transformación plegable.

Sin embargo, crear los modelos geométricos a escala 1:5 aportó experiencias acerca de cuáles serían los inconvenientes de estos sistemas realizados a escalas reales y con ello subsanar los problemas a tiempo, para fabricar un sistema transformable con mucha mayor funcionalidad y que pueda servir para la generación de nuevos espacios multifuncionales, flexibles, adaptables a cualquier contexto, ligeros y fáciles de transportar. Es decir, una nueva forma de ver el espacio, que no es siempre rígido, sino cambiante y caduco. En la actualidad, el usuario moderno está sometido a constantes cambios y al crecimiento familiar en determinados momentos de su vida. Aunque es pertinente decir que en esta investigación hay puntos que

tendrán que estudiarse más a fondo. Tal es el caso de la adaptación del cascarón plegable, pues aún no se ha resuelto del todo el proceso de su plegabilidad. Este sistema se puede dar de varias maneras, pero por cuestiones prácticas, en este caso solo se realizó una de las posibles transformaciones. También el sistema constructivo se transforma en un principio de diseño y se determina cómo será el proceso de montaje en un terreno aislado, lo que puede retomarse para crear diferentes posibilidades de montaje y analizar las propiedades físicas de los materiales utilizados para saber si la estructura estará dentro de los rangos de seguridad.

Por último, este tema de investigación da una pauta de diseño para el proyectista, que debe considerar todas estas experiencias y premisas para elaborar un diseño plegable acorde a las necesidades espaciales del usuario, pero también armónico con su contexto.

Referencias

- Arquitectura y tecnología (2010). Estructuras recíprocas. Recuperado de: <http://arqytec.blogspot.com/2010/07/estructuras-reciprocas.html>
- Escrig, F. & Valcárcel, J. P. (1988). Estructuras espaciales desplegables curvas. *In: formas de la Construcción*, 39(393), 53-71. doi: 10.3989/ic.1988.v39.i393.1606
- Likedesigns (2010). Recuperado de: piojilikes.blogspot.mx
- Morales Guzmán, C. C. (2007). *Sistemas flexibles en la vivienda*. México: Universidad Cristóbal Colón.
- Morales Guzmán, C. C. (2009). *Diseño de sistemas estructurales flexibles en el espacio arquitectónico*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morales Guzmán, C. C. (2010). *Cubiertas flexibles plegables en la arquitectura*. España: Universidad Camilo José Cela.
- Morales Guzmán, C. C. (2013). *Informe Técnico: Sistemas Estructurales Retráctiles*. México: Universidad Veracruzana.
- Rodríguez, N. (2007). La construcción ligera. Invenciones en la arquitectura primogénita. *Tecnología y Construcción*, 23(3), 9-20.
- Efímeras: alternativas habitables (s.f.). Recuperado de: <http://www.efimeras.com>
- Fundación Emilio Pérez Piñero (s.f.). Recuperado de: <http://www.perezpinero.org>